

大型带钢轧机动态特性分析与动力学修改^{*}

姚爱英, 熊晓燕, 王然风, 李建民

(太原理工大学机械电子工程研究所 太原, 030024)

摘要 为避免轧机运行中出现不稳定振动, 提出轧机故障诊断与设计缺陷分析的综合方法。首先, 在现场运行状态下采集控制系统参数与轧机结构振动等数据; 然后, 采用支持向量回归技术进行控制系统辨识, 根据得到的辨识模型诊断控制系统的稳定性, 提出了环节动力学分析的概念与方法, 建立控制系统与机械结构的混合数学模型, 实现不同损伤状态下的仿真与运行稳定性预测; 最后, 通过结构动力学修改或再设计, 消除由于结构损伤或设计不当导致的轧机自激振动。

关键词 带钢轧机; 支持向量回归; 系统辨识; 环节动力学; 动力学修改

中图分类号 TH112; TP13; TP15

引言

现代大型热连轧机由机电液等部分与控制系统组成。轧机压下控制系统是通过复杂的轧机结构(包括轧辊系)对被轧钢板施加压下力, 各种反馈传感器通过轧机上相应结构传递运动和力。一旦这些结构存在设计缺陷或发生损伤, 将使轧机出现异常振动。因此, 有必要进行轧机运行性能定期监测、结构动力学建模与故障诊断, 采取相应的结构动力学修改措施, 使轧机恢复正常运行。近年来, 轧机运行监测、故障诊断以及结构动力学修改等问题引起国内、外学者的广泛关注^[1-4]。邹家祥等^[5]通过对高速带钢冷轧机的综合测试、振源分析与工艺润滑试验确定了引起轧机振动的主要原因以及振动类型。文献^[6]提出基于小波与神经网络的带钢轧机故障诊断方法, 并应用于轧机AGC控制系统。

笔者提出包含基于运行监测数据的系统辨识、结构环节动力学分析、系统建模与仿真以及结构动力学修改等的大型轧机综合分析结构与结构动力学修改方法。在此基础上进行轧机故障诊断与设计缺陷分析, 通过结构动力学修改提高控制系统运行稳定性, 消除异常振动, 从根本上改善轧机的运行性能。这种方法应用于大型热连轧机取得了较好效果。

1 支持向量回归系统辨识与控制系统运行状态分析

大型带钢轧机由机架、轧辊及其传动等机械结

构以及电液伺服液压压下控制系统(AGC)等组成, 其中液压压下控制系统是由辊缝位移反馈、压下力反馈与板厚反馈等多反馈环组成。平板精轧机带板厚控制系统(AGC)构成如图1所示。

电液伺服液压压下系统以辊缝位移反馈为主反馈环, 其输入为伺服阀电流, 输出为辊缝位移。为实现轧机运行状态的定量分析, 在振动测试的同时同步测试指令电流信号(输入)和辊缝位移信号(输出), 辨识输入到输出间的开环系统数学模型。轧机测试是在闭环运行状态下进行, 存在系统的可辨识性和开环数学模型的近似性问题。

如果采用设计的输入信号和试验过程可以得到满意的系统辨识结果。但是对于压下力达2~3千吨的复杂热连轧过程与轧机来说, 在运行状态下使用人为输入信号进行系统辨识显然是不可能的。因此, 轧机液压压下控制系统的辨识只能在其闭环运行状态下测量包含系统部分环节的输入、输出信号, 此辨识作为系统的一部分数学模型, 存在系统闭环可辨识性问题。上述研究只是整个系统的一部分, 中间隔有采样-数字环节, 在以后分析中可以看到, 反馈通道含有时间滞后环节, 因此这部分输入和输出噪声的相关性很弱, 可以假设为不相关的, 这样就可以辨识所研究的系统。

统计学习理论和支持向量回归技术^[7]作为研究有限样本情况下机器学习的理论和算法, 较好地解决了小样本、非线性、高维数、局部极小点和推广能

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51035007, 50975188); 山西省高校青年学术带头人支持计划资助项目
收稿日期: 2012-06-02; 修改稿收到日期: 2012-07-01

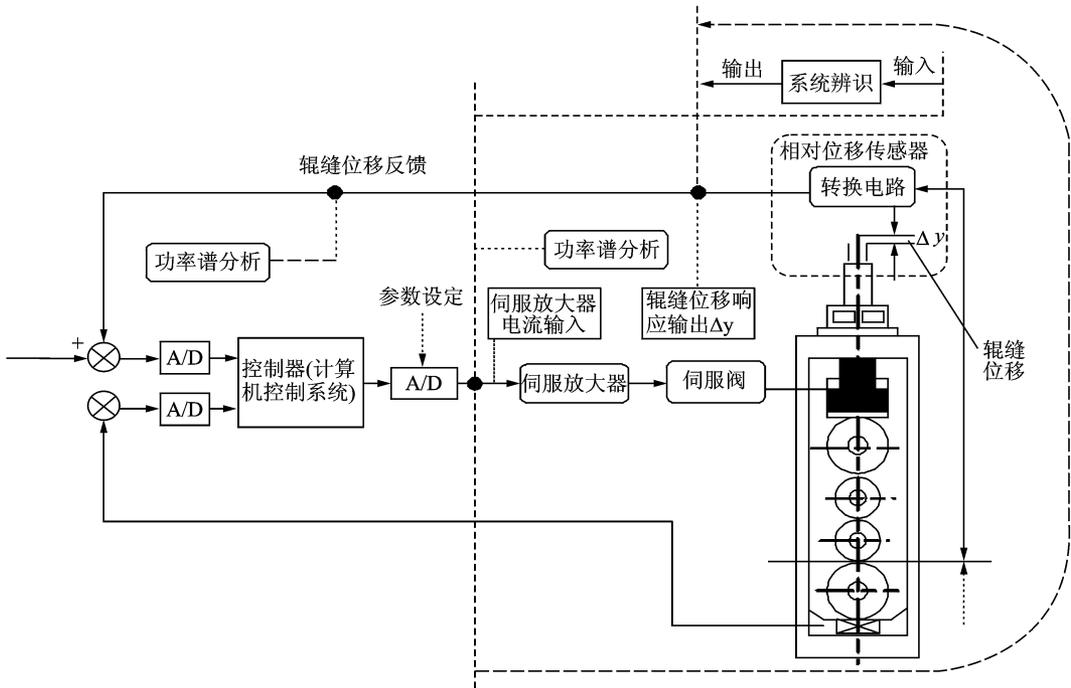


图1 平板精轧机的带板厚控制系统(AGC)的构成

力等实际问题,为有限样本条件下的大型复杂机电设备的故障诊断提供了理论基础和技术支撑(特别是针对大型复杂机电系统故障样本有限,现场条件不允许轧机一直在故障条件下运行,本研究项目轧机振动就只有有限振动样本。

辨识以伺服阀电流为输入,以辊缝位移为反馈信号输出的系统数学模型如图1所示。采用ARX(自回归)模型的结构形式

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (1)$$

其中: $u(t)$ 为系统输入序列(伺服阀电流); $y(t)$ 为系统输出序列(辊缝位移); t 为时间, $t=1,2,\dots,n$; $e(t)$ 为依赖于时间 t 的预测误差序列,通常 $\{e(t), t=1,2,\dots\}$ 为白噪声,即有零均值和标准差的独立随机变量序列; nk 为输出数量到输入数量的延迟数; A 和 B 为延迟算子 q^{-1} 的多项式,分别为

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-na}$$

$$B(q) = 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-nb}$$

基于支持向量回归的系统辨识就是经过数据训练确定一个函数 f ,即辨识系统的内部模型满足对于任何输入 x 能够在精度范围内找到对应的输出 y ,线性函数估计问题可描述为

$$f(x, \alpha) = \langle w \cdot x \rangle + b \quad (2)$$

最优的回归函数是在一定的约束条件下最小化泛函,基于支持向量机的线性回归方法就是最小化

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \cdot \sum_{j=1}^n (\xi_j + \xi_j^*) \quad (3)$$

其中: ξ_j^*, ξ_j 为松弛变量; C 为常数,计算时转化为其对偶问题,最大化目标函数为

$$w(\alpha, \alpha^*) = -\epsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^n x_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j^* - \alpha_j) \langle x_i, x_j \rangle \quad (4)$$

相应的回归函数为

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b = \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_j) \langle x_i, x_j \rangle + b^* \quad (5)$$

对于非线性问题,核函数 $K(x_i, x_j)$ 对应映射到特征空间的数据的内积,用核函数 $K(x_i, x_j) = \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle$ 代替线性回归中的内积 $\langle x_i, x_j \rangle$,把低维空间的非线性问题映射成高维空间的线性问题,利用线性回归的方法进行计算,计算式为

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b = \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_j) \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle + b^* \quad (6)$$

其中: $\phi: Rd \rightarrow F$,映射到特征空间的向量; $\langle \rangle$ 表示特征空间中的内积; $w \in F$ 且 $b \in R$,可通过解二次规划优化问题求出最小正则化风险泛函。

w 在特征空间 F 与函数 $\phi(x)$ 的线性组合形式为

$$w = \sum_{j=1}^n (\alpha_j^* - \alpha_j) \phi(x_j) \quad (7)$$

其中:系数 $\alpha_i^*, \alpha_i \in R$,通过解凸二次规划问题确定。

对于非线性系统,下式作为辨识结果

$$\begin{cases} \mathbf{w} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i) \phi(x_i) \\ f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, y_i) + b \end{cases} \quad (8)$$

某钢铁企业的大型热连轧精轧机在轧制过程的咬钢冲击扰动下发生自激振动,在此情况下测量控制系统中伺服阀的电流输入与辊缝位移输出,采用式(1)的模型结构形式通过支持向量回归系统辨识,忽略测试噪声 $e(t)$,将辨识得到的轧机异常振动条件下的模型参数代入式(1),得到

$$\begin{aligned} & (1 - 0.9684q^{-1} + 0.4854q^{-2} + 0.03247q^{-3} - \\ & 0.1746q^{-4} + 0.1156q^{-5} + 0.04534q^{-6} - \\ & 0.1854q^{-7} - 0.2115q^{-8})y(t) = \\ & (-0.0003232q^{-12} + 0.0007728q^{-13} - \\ & 0.0009546q^{-14} + 0.000824q^{-15} - \\ & 0.0003076q^{-16} + 6.931e-5q^{-17})u(t-nk) + e(t) \end{aligned}$$

所辨识的模型为8个极点、6个零点12个纯延时。根据辨识的数学模型作有故障轧机控制系统的根轨迹图如图2所示。可见,系统是不稳定的,在咬钢扰动下采集如图3所示的时域波形自激振动信号。采用基于支持向量回归的系统辨识方法提高了系统模型的精度和泛化能力,克服了传统统计学理论由于样本有限带来的辨识模型误差大的问题,为基于模型的故障诊断方法提供高可靠和高精度的模型,此方法可成功地应用到大型复杂机电设备故障辨识。

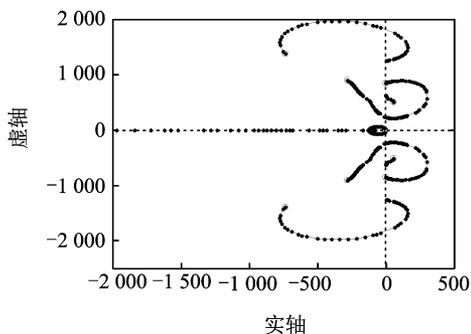


图2 有故障轧机控制系统的根轨迹图

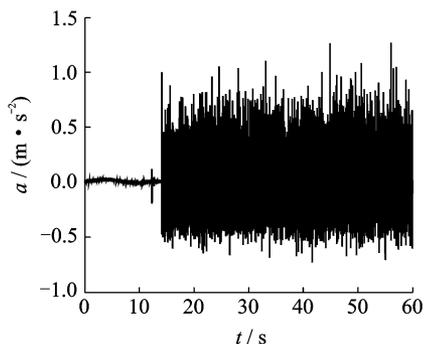


图3 轧机自激振动加速度时域波形

2 机械系统环节动力学分析与仿真

为诊断大型轧机在咬钢扰动作用下产生自激振动的结构原因,提出轧机结构环节动力学分析方法。图4所示为轧机各个环节动力学分析。

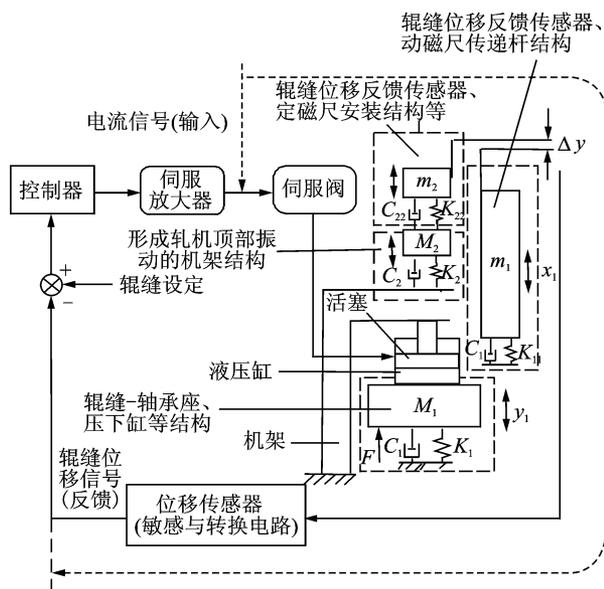


图4 位移反馈运动传递环节结构的系统图

通过动力有限元分析得到轧机机架的模态参数,其第12阶固有频率为175.471 Hz,振型为垂直振动,轧机机架的12阶固有频率接近于实测的自激振动频率。机架有限元分析模型的12阶振型如图5所示。

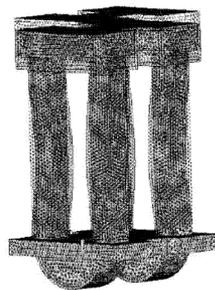


图5 机架12阶固有振型

在此频率下经过动力学分析得到图4各环节的传递函数。

$$H_1(s) = \frac{1}{3 \times 10^3 s^2 + 1 \times 10^5 s + 2.3 \times 10^9} \quad (9)$$

辊缝位移传感器与定尺支座的简化传递函数 $H_2(s)$ 为

$$H_2(s) = \frac{7.018 \times 10^7}{130s^2 + 5.04 \times 10^3s + 7.018 \times 10^7} \quad (10)$$

辊缝位移传感器与动尺通过轧辊系-滑块的简化传递函数 $H_3(s)$ 为

$$H_3(s) = \frac{1}{50 \times 10^3s^2 + 1 \times 10^7s + 2 \times 10^9} \quad (11)$$

辊缝位移传感器与动尺运动传递杆的简化传递函数 $H_4(s)$ 为

$$H_4(s) = \frac{1.89 \times 10^7}{10s^2 + 3 \times 10^3s + 1.89 \times 10^7} \quad (12)$$

3 结构动力学修改与工业运行效果

通过对轧机系统各个环节进行灵敏度分析得到最佳结构动力学修改方案。该方案为修改辊缝位移传感器定尺支座的结构参数,经修改后定尺支座的简化传递函数变为

$$H_2(s) = \frac{1.04 \times 10^7}{130s^2 + 5.04 \times 10^3s + 7.018 \times 10^7} \quad (13)$$

通过灵敏度分析后修改后,式(13)的传递函数 $H_2(s)$ 的增益远小于式(10)中没有经过结构动力学修改的传递函数 $H_2(s)$ 的增益。经结构动力学修改后,通过控制系统的根轨迹分析及系统仿真判定系统是稳定的。动力学修改后轧机结构的实测振动信号时间历程如图6所示。发生咬钢冲击时结构振动很快衰减,系统不发生自激振动。

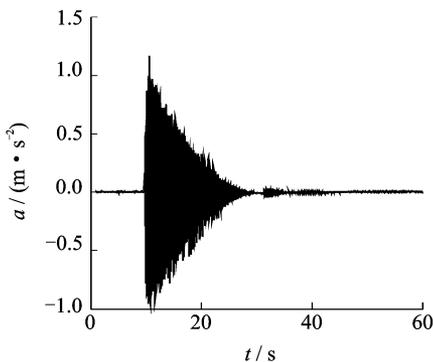


图6 结构实测振动信号

4 结束语

通过轧机运行过程中的电液伺服控制系统参数测试、振动测试、系统辨识、稳定性分析、环节动力学分析等理论与试验相结合的定量分析过程,确定造成轧机自激振动的结构原因。在此基础上经结构灵

敏度分析与动力学修改,对轧机机架顶部局部结构进行修改设计,提高了液压下控制系统的稳定裕度,消除轧机运行中的自激振动,保证轧机在热连轧过程中稳定、高效运行。

参 考 文 献

- [1] 熊诗波,王然风,梁义维,等. 轧机自激振动诊断和结构动力学修改[J]. 机械工程学报,2005,41(7):147-151. Xiong Shibo, Wang Ranfeng, Liang Yiwei, et al. Self-excited vibration diagnosis of the rolling mills and structure dynamics modification [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41 (7): 147-151. (in Chinese)
- [2] 赵弘,白晶. 轧机振动及非线性分析[J]. 机械,2003,30(5):16-19. Zhao Hong, Bai Jing. Analysis of rolling mill vibration and nonlinear [J]. Machinery, 2003, 30 (5): 16-19. (in Chinese)
- [3] Yao L, Postlethwaite I, Browne W, et al. Design, implementation and testing of an intelligent knowledge-based system for the supervisory control of a hot rolling mill [J]. Journal of Process Control, 2005, 15: 615-628.
- [4] Min Dong, Cai Liu. Design of fault diagnosis observer for HAGC system on strip rolling mill [J]. International Journal of Iron and Steel Research, 2006, 13: 27-31.
- [5] 邹家祥,史小路,孙志辉,等. 带钢冷连轧机自激振动诊断[J]. 钢铁,1997,32(7):64-68. Zou Jiexiang, Shi Xiaolu, Sun Zhihui, et al. Diagnosis of the self-excited vibration in continuous cold strip rolling mill [J]. Iron & Steel, 1997, 32 (7): 64-68. (in Chinese)
- [6] Li Guoyou, Dong Min. A wavelet and neural networks based on fault diagnosis for HAGC system of strip rolling mill [J]. International Journal of Iron and Steel Research, 2011, 18: 31-35.
- [7] Smola A J, Lkopf B S. A tutorial on support vector regression [J]. Statistics and Computing, 2004, 14: 199-222.



第一作者简介:姚爱英,女,1972年5月生,讲师、博士研究生。主要研究方向为机械测试与故障诊断等。曾发表《桥式起重机械桥架的计算机辅助设计》(《太原理工大学学报》2004年第6期)等论文。
E-mail: yaoaiying@tyut.edu.cn